

INFLUENCIA DE LAS GRANDES PRECIPITACIONES EN LA GARANTÍA DE ENTREGA DE AGUA ANUAL

INFLUENCE OF EXTREME RAINFALL IN THE ANNUAL WATER SUPPLY

Eduardo O. Planos Gutiérrez¹

Resumen

Las grandes precipitaciones tienen una influencia relevante en el valor de la lámina de precipitación anual, y por tanto también en el escurrimiento anual. Habitualmente estas precipitaciones son analizadas por su peso en los desastres hídricos; sin embargo, pocas veces se trata la manera de cómo considerarlas en el análisis de los valores promedios y sus aplicaciones. En la literatura relacionada con el tema, no existen artículos relevantes que realicen este análisis. Considerando que las grandes precipitaciones tienen una rara frecuencia y una influencia relevante en los promedios hidrológicos, este artículo expone la relación entre las grandes precipitaciones y la garantía de entrega anual de agua.

Palabras claves: grandes precipitaciones, series mezcladas, garantía de suministro de agua

Abstract

The heavy rainfall have a significant influence on the value of annual rainfall, and therefore also in the annual runoff. Usually these precipitations are analyzed by their weight in water disasters; however, their role in the mean values is rarely considered, for practical purposes. In the relevant papers about this matter is not present that kind of analysis. Whereas the extreme rainfall has a rare frequency and a major influence on hydrological averages, this article describes the relationship between heavy rainfall and annual plan of water delivery.

Keywords: heavy rainfall, mixed series, guarantee water supply

1. INTRODUCCIÓN

La lámina anual promedio de precipitación, es una magnitud que incluye los aportes pluviales de varios fenómenos hidrometeorológicos (precipitaciones convectivas locales, frentes fríos, huracanes, entre otros), cada uno de ellos con características propias, fundamentalmente en cuanto a frecuencia y capacidad pluvial. En el caso de Cuba, donde la única fuente importante de agua es la precipitación, esta magnitud está formada por aportes de lluvia de fenómenos extratropicales, tropicales no ciclónicos y ciclónicos. Los fenómenos ciclónicos, a diferencia del resto de los mencionados, son los de mayor capacidad pluvial, con facilidad rebasan los 400 mm en menos de 10 horas. En una lámina anual de precipitación promedio de muchos años, el peso de los registros ciclónicos puede representar más del 15% del valor total. Sin embargo, los ciclones no afectan a un mismo territorio todos los años; lo que ocasiona que, a pesar de su significativo peso en el valor promedio anual, el agua que éstos generan no esté garantizada anualmente. Lo anterior puede ser analizado con un enfoque similar al de poblaciones mezcladas.

Este es un tema complejo, que no ha sido frecuente en la literatura y práctica hidrológica relacionada con el dimensionamiento de la capacidad de los embalses

y la administración del agua almacenada en ellos. Por tanto, este artículo expone el tema, presentando el impacto que tienen las grandes precipitaciones en la lámina anual y el promedio hiperanual de esta variable, y en el escurrimiento, con una propuesta preliminar de cómo tratar este asunto; reconociendo que aún hay mucho que profundizar.

Los resultados expuestos en este artículo corresponden a un estudio de caso desarrollado para la provincia de Pinar del Río en el occidente de Cuba.

2. MARCO CONCEPTUAL

La definición de grandes precipitaciones es todavía un concepto empírico. La calificación de una lámina de lluvia como tal es descrita de dos maneras fundamentales, por un lado se refiere los registros máximo-absolutos de 24 horas, que suelen agruparse en una serie cronológica y, en un sentido más amplio, esta denominación comprende a todos los eventos que en 24 horas o menos igualen o superen la lámina de 100mm. Con más rigor científico, los climatólogos cubanos refieren como grandes precipitaciones "... aquellas en que se acumulan 100 mm o más de lluvia en una localidad durante 24 horas o menos.

¹ Instituto de Meteorología, Cuba. Loma de Casablanca S/N. Municipio Regla. Habana. Cuba CP 11700. eduardo.planos@insmet.cu

Su ocurrencia está fuertemente determinada por la combinación que se produce entre las circulaciones atmosféricas, a diferentes escalas espaciales, y los factores físico-geográficos de la región, por lo que, generalmente, se asocian a la aparición de determinados patrones de circulación sobre Cuba...”, (Alfonso et al, 1997). Mientras que, desde la óptica hidrológica de los eventos máximos relacionados con los grandes procesos fluviales extremos, este concepto se limita a los eventos pluviales que mantienen una intensidad elevada y sostenida durante intervalos de tiempo superiores al de concentración promedio de las cuencas enclavadas en un área y que provocan simultáneamente en una región crecidas notables (Planos et al, 2012). Otro elemento que se ha sido tenido en cuenta para la conceptualización y caracterización de las grandes precipitaciones, es el peso que éstas tienen el acumulado total de lluvia de un intervalo determinado de tiempo, que muchas veces determina la clasificación de la pluviosidad de un período, en cuanto a su denominación como seco, medio o húmedo; lo cual, si no es debidamente analizado, puede conducir a errores en la interpretación del comportamiento de la precipitación (Planos et al, 2012). Pero aún no existe una argumentación científica, debidamente fundamentada, que incluya en la definición de grandes precipitaciones elementos físicos que justifiquen el umbral de 100 mm utilizado en Cuba para clasificar este fenómeno.

En la práctica es reconocido el papel de estos eventos pluviales en el balance hidrológico de una región; en Cuba, por ejemplo, frecuentemente se hace alusión a la necesidad del paso de depresiones tropicales o ciclones, sobre todo cuando los embalses y acuíferos están muy deprimidos por el impacto de un proceso de sequía prolongado e intenso; un sistema meteorológico de esta naturaleza puede ser capaz de satisfacer, en unos días, la carencia de agua almacenada. No obstante lo anterior, como podrá apreciarse en la breve revisión bibliográfica que sigue a continuación, los trabajos realizados sobre este tema apenas abordan la influencia de las grandes precipitaciones en el balance hídrico, y, en opinión de este autor, la práctica ingeniera relacionada con el planeamiento hidráulico y la administración del agua, no dispone herramientas que considere adecuadamente esta influencia.

Planos et al (2012), presentaron una exhaustiva revisión bibliográfica que resume los trabajos realizados en Cuba hasta el año 2012, y de obras importantes de la literatura internacional; éstas últimas seleccionadas por haber marcado un hito en esta temática. A continuación se presenta, resumidamente, una selección de obras relevantes relacionadas con las grandes precipitaciones, que fueron incluidas en la revisión bibliográfica antes mencionada. Estos conocimientos constituyen el marco teórico antecedente del análisis que se presenta en este artículo, sin llegar a ser una evaluación del estado del arte en este tema.

2.1 Síntesis de algunos trabajos realizados en Cuba

En Cuba, el primer trabajo conocido publicado fue “*La lluvia en la Habana*” (Millás, 1943), donde se realiza un estudio descriptivo detallado de la intensidad de las precipitaciones por intervalos de tiempo, basado en 33 años de información del antiguo Observatorio Nacional y acompañado de una cronología de las lluvias con intensidades iguales y mayores de 0.5 mm.min⁻¹. En este resultado se señala como máxima intensidad un registro de 3.3 mm.min⁻¹, se resalta la baja frecuencia de intensidades mayores de 2 mm.min⁻¹ y se plantea que intensidades entre 1.5 y 2 mm.min⁻¹ han llegado a durar hasta dos horas. Este autor, basado en el análisis de una serie de 83 años (1859 - 1941) determina dos períodos con diferencias notables entre sus medias (1859-1898 y 1899-1941), y según refiere, el primero más homogéneo y el segundo más variable, con una oscilación entre los totales anuales máximos y mínimos de casi el doble del primer período, y la ocurrencia de muchos años con totales anuales inferiores a 1000 mm, varios de ellos consecutivos.

En el año 1958 se publicó en trabajo “*Intensidad de la lluvia en La Habana*” (Martínez, 1958), que aborda el tema de la intensidad de las precipitaciones con un enfoque ingenieril. Martínez utilizó en su análisis un método gráfico-analítico, aplicado a las series de registros de dos pluviógrafos instalados en la ciudad de la Habana, y comparó los valores obtenidos con otros correspondientes a dos regiones de los E.E.U.U (zona de Galveston, New Orleans, Jacksonville y zona de New York, Philadelphia, Washington y Atlanta). Desde el punto de vista geográfico, las regiones de E.E.U.U escogidas por Martínez no fueron apropiadas para compararlas con el comportamiento de la precipitación en Cuba; pero comparando los resultados obtenidos por el ingeniero cubano con los valores estimados para el sur de los E.E.U.U., se comprueba que las conclusiones de este estudio no difieren mucho entre sí.

El trabajo de Martínez resultó un gran aporte al estudio de las intensidades de las lluvias de diferentes duraciones y probabilidades en el país, y hay que mencionar que fue el único que existió por mucho tiempo para el cálculo de las intensidades de las lluvias para pequeños intervalos de tiempo (de hasta 2 horas). Por otra parte, este trabajo refleja un estadio temprano en las investigaciones sobre los extremos hidrológicos, donde debido a la disponibilidad de datos y la longitud de las series, era imposible hacer estudios precisos o regionales, que permitieran comparar los cálculos, por lo que la ingeniería de entonces se basaba en estimaciones locales y en el buen juicio de los especialistas.

En 1967, en la publicación “*Las Precipitaciones en la Isla de Cuba*” (Trusov, 1967) se hace un detallado análisis del comportamiento de la lluvia en el país. La red disponible para esta investigación tenía equipos

con largos registros pero con una distribución espacial insuficiente. Se elaboraron mapas de láminas de lluvias del 1, 5 y 10% de probabilidades. No obstante las limitaciones de la red, Trusov elaboró un conjunto de importantes conclusiones sobre el comportamiento de las grandes precipitaciones, que conservan validez, las cuales se resumen a continuación: las grandes precipitaciones en Cuba pueden ocurrir en cualquier época del año; la distribución espacial de la lluvia anual y del período húmedo siguen el patrón de distribución de las grandes precipitaciones; y existen áreas del país donde la frecuencia de este tipo de lluvia es baja, como en el norte de la parte central de la Isla de Cuba.

Berdo Koshiasvili (1972), con su trabajo *“Las lluvias torrenciales en Cuba”* hizo un aporte importantísimo al estudio de las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas. Los objetivos principales del trabajo de Koshiasvili fueron: (a) hacer una caracterización de estas lluvias, (b) elaborar un mapa isoyético de la lámina de lluvia del 1% de probabilidad, (c) difundir en Cuba la metodología del cálculo de la intensidad de la lluvia por intervalos de tiempo característicos (5, 10, 20, 40, 60, 90, 150, 300, 720, 1440 y 2880 min.) y (d) lograr un documento de carácter metodológico para hacer estudios similares, que pudiera ser actualizado periódicamente. Para esto contó con una red de estaciones pluviométricas bien distribuida y con series de observación prolongadas. En 1972 se construyeron las primeras curvas de *Intensidad-Duración-Frecuencia* de la lluvia (IDF), para equipos aislados en diferentes localidades de Cuba.

Koshiasvili logra establecer diferencias en el comportamiento de las grandes precipitaciones dependiendo de los sistemas meteorológicos que las producen, fundamentalmente entre las de origen convectivo local y las ciclónicas. Estas diferencias conciernen a la duración de los aguaceros, la intensidad y la distribución horaria de la lámina de lluvia.

En la obra *“El escurrimiento medio y formas de las avenidas”* (Matakiev, 1973), es notable la claridad conceptual del autor sobre el papel que desempeña en la Hidrología y más específicamente en la formación y tratamiento de las series cronológicas de eventos máximos, la génesis pluvial del fenómeno. Este autor formula los criterios siguientes: (a) *“... la probabilidad de ocurrencia de una avenida, al igual que de un fenómeno cualquiera, no debe fundamentarse solamente en los registros locales de observación, sino también en su origen y posibilidad”*; (b) *“...Los puntos empíricos que definen la marcha principal de la curva teórica son producto de avenidas provocadas por lluvias intensas, pero éstas no tienen origen común”*; (c) *“...la confusión en el origen de los fenómenos disminuye la representatividad de los datos de una serie, ya que un pronóstico derivado de esa forma a través de la curva teórica de probabilidad correspondiente, resulta dudoso.Aquí se habrá*

supuesto que la serie sea representativa, lo cual no será rigurosamente cierto cuando se trate de series cortas de avenidas producidas por lluvias intensas de origen heterogéneo”; y (d) *“...teóricamente, las grandes avenidas de baja probabilidad, son fenómenos extraordinarios que no se pueden observar al mismo tiempo en muchos ríos de la misma región. Sin embargo, tal ocurrencia es alterna y frecuente, por lo que estos casos dejan de ser extraordinarios desde el punto de vista climático”*.

En 1988, Lapinel, basado en una serie histórica de 10 años (1971-1980), aporta su obra *“La circulación atmosférica y las características espacio temporales de las lluvias en Cuba”*, donde describe nueve situaciones sinópticas que influyen predominantemente sobre el país y, de hecho, en el comportamiento de la lluvia, a saber: (1) Influencia muy cercana del Anticiclón del Atlántico, (2) Flujo anticiclónico extendido, (3) Débil gradiente barométrico, (4) Ciclón tropical, (5) Zonas de convergencia en el flujo, (6) Baja extratropical, (7) Zonas frontales, (8) Anticiclón típico continental migratorio y (9) Situaciones indeterminadas. Además de caracterizar climatológicamente las situaciones sinópticas, este autor establece la participación general que tiene cada una de ellas en el comportamiento de la lluvia, siendo útil a los objetivos de este artículo, la determinación del peso que tiene la lluvia debida a cada una de estas situaciones en la lámina promedio anual que se acumula en el occidente y oriente del país.

En Planos (1991, 1999, 2000) y Planos et al (2005, 2012), se estudia profundamente las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas según su origen meteorológico. En estos trabajos se realiza un detallado análisis de los métodos empleados comúnmente en el estudio de estas precipitaciones; y se caracterizan según su origen, determinando diferencias físicas en su comportamiento, desde el punto de vista de su distribución espacio temporal, la magnitud de los parámetros que las caracterizan (media, coeficiente de variación); se construyen relaciones típicas (intensidad por intervalos determinados, curvas IDF, curvas de masa); se estudia la variabilidad de estas láminas extremas en series de más de 100 años de longitud y se determina y regionaliza el peligro y riesgo por precipitaciones intensas. Particularmente, en la obra del año 2012 se aborda por primera vez el tema que del que es objeto este artículo, la influencia de las grandes precipitaciones en la gestión del agua.

Un trabajo de particular importancia es el denominado *“Sistema de reconocimiento de patrones² de eventos de lluvias intensas en la mitad occidental de Cuba”* (Arencibia, 2009). Aquí se admite la importancia de conocer los patrones atmosféricos que provocan este tipo de precipitaciones. El autor fundamenta su estudio en la hipótesis de que a partir de la

2 Configuraciones sinópticas bien determinadas

identificación de los patrones sinópticos que producen eventos de lluvias intensas, es posible diseñar un sistema que permita su reconocimiento, a corto y mediano plazo, cuestión esencial para las aplicaciones prácticas que pretendan vincular el quehacer meteorológico con el hidrológico, además de profundizar en el conocimiento de las causas de las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas.

Se determinaron patrones de eventos de lluvias intensas en el período lluvioso y en el período poco; dejando claramente establecido que la mayor cantidad de eventos de lluvias intensas estuvo asociada a patrones de ciclones tropicales, no obstante el mayor número de días con lluvias localmente intensas estuvo asociado a patrones frecuentes de la circulación atmosférica. Utilizando técnicas analógicas, se elaboró una metodología para identificar o reconocer los patrones que generan eventos de lluvias intensas en la mitad occidental de Cuba, que fue validada satisfactoriamente.

2.2 Síntesis de trabajos realizado por autores internacionales

En la bibliografía internacional esta temática ha sido ampliamente tratada, y en ella también se refleja que el conocimiento de este fenómeno y de los métodos de análisis han estado principalmente determinadas por prácticas ingenieras, principalmente las relacionadas con el diseño hidráulico y, en menor medida, con pronósticos meteorológicos, utilizando métodos estadísticos y dinámicos. Hasta finales de los años setenta las discusiones se dirigían a determinar cuáles eran las funciones de distribución más adecuadas para el procesamiento de las series cronológicas y a la obtención de curvas de relaciones entre variables y de envolventes que representan el comportamiento espacio-temporal de los fenómenos hidrológicos máximos; aunque el foco ha estado siempre puesto en las predicciones probabilísticas de los valores extremos. La lista de autores que han abordado esta materia es inmensa; por ello, como representativo de lo realizado en una época, de la situación actual y de las tendencias en el desarrollo del conocimiento sobre este tema, se ha seleccionado un grupo limitado de obras, sin pretender que estas sean las cumbres de las investigaciones realizadas en el mundo; tan solo han sido escogidas porque recorren con objetividad y acierto, la historia y futuro de los trabajos sobre los extremos hidrológicos máximos. Concorde con lo anterior, a continuación se comentan los trabajos de B. Sevruk y H. Geiger (1981) y Cunnane (1989), sobre el modelado estadístico de las series cronológicas de eventos máximos, en las cuales se hace un resumen del estado del conocimiento sobre este tópico hasta finales de la década del ochenta; y el trabajo de Madsen H. y Rosbjerg D. (1997) que expone los avances en esta práctica.

Selection of distribution types for extremes of precipitation. (B. Sevruk y H. Geiger, 1981)

Los autores examinan los métodos históricamente utilizados en la selección de los tipos de distribución para el análisis de los valores extremos; resaltando la particular importancia que, para esta elección, tiene considerar las características climáticas regionales y de los eventos pluviales. Estos autores recorren conceptual y metodológicamente los aspectos que deben ser considerados para elegir una función de distribución, demostrando que esto no debe ser un criterio matemático basado exclusivamente en un buen ajuste, sino que debe considerar todos los elementos que deciden las características de las series de valores máximos y los elementos físico-geográficos que influyen en la ocurrencia de los extremos hidrológicos; elemento sumamente importante, porque debido al papel que tiene la estadística matemática en los métodos de análisis climatológicos e hidrológicos, muchas veces se ha caído en el error de matematizar el problema por encima del sentido físico. Para realizar este trabajo Sevruk y Geiger revisaron una extensa bibliografía, y como nota curiosa, puede referirse que el artículo más antiguo tenido en cuenta por ellos, es: "*Criterion for de rejection of doubtful observations*", publicado por Pierce en la *Astronomical Journal* del 1852; el tema de este antiguo artículo es aún muy debatido y no bien resuelto en la literatura contemporánea.

En la composición de las series consideran imprescindible atender a los elementos siguientes: determinación de la influencia de los errores sistemáticos en la observación; el estudio de la consistencia, la homogeneidad y aleatoriedad de las series; la influencia en los cálculos de la longitud de las series y el papel de los valores anómalos. Y en cuanto a los métodos de análisis de frecuencia de los valores extremos, indican que existen tres fundamentales: (a) análisis de frecuencia de series compuestas por el valor máximo absoluto anual; (b) el modelado de las series temporales con modelos estadísticos complejos y (c) el estudio de series de duración parcial. Concretándose a los métodos referidos como (a) y (c), concluyen que es imprescindible seleccionar la distribución adecuada, teniendo en cuenta la influencia que sobre el modelado de frecuencia puede tener el clima, los factores físico geográficos y la duración de la precipitación; y una vez elegida la función de distribución, es importante prestar atención a la forma como se determinan los parámetros del ajuste, a la comprobación de la bondad del ajuste dentro de intervalos de confianza correctamente determinados y a la posición de ploteo si se utilizan métodos gráfico analíticos.

En sus conclusiones Sevruk y Geiger reflejan con claridad el estado del conocimiento mundial en esta temática hasta 1981:

“El análisis de la frecuencia de los valores extremos de precipitación es generalmente aplicado a las series de valores máximos anuales. La precisión del análisis depende de la validez de ciertas suposiciones que deben ser demostradas con el propio estudio estadístico. El error debido a la insuficiente longitud de las series varía entre el 30 y 50 por ciento, en el rango de extrapolación, y el error debido a una incorrecta elección del tipo de distribución de frecuencia puede ser mayor; mientras que la diferencia entre los estimados obtenidos con una misma distribución en una serie de datos, pero ajustando los parámetros con métodos distintos, puede llegar hasta el 20%.

Las distribuciones más frecuentemente utilizadas en la práctica internacional son las denominadas Extrema de Tipo I y la Log-Normal. Algunas distribuciones pueden ser mejores que otras bajo determinadas condiciones estacionales o físico-geográficas, pero no existe un criterio de aplicabilidad para las diferentes distribuciones y métodos de ajuste de sus parámetros, que no sean las pruebas estadísticas de calidad del ajuste y la comparación de los valores observados con los modelados usando las distribuciones teóricas.

Entre todos los métodos existentes para el ajuste de los parámetros de las funciones de distribución, el de Máxima Verosimilitud se considera el más eficiente, pero es a su vez el más complicado de trabajar numéricamente; contrariamente, el Método de los Momentos es menos preciso pero más fácil de trabajar. Una ventaja de ambos métodos es que no requieren del uso de fórmulas de posición, que aún son controversiales.”

Statistical distributions for Flood frequency analysis. (C. Cunnane, 1989)

Esta es una de las revisiones más importantes realizadas sobre las técnicas de ajuste de funciones de distribución de frecuencias a series de máximos anuales (MA) y de duración Parcial (DP). En el trabajo se definen y comparan los modelos MA y DP y se desarrolla la relación entre el período de retorno T y la función de distribución de las magnitudes de las crecidas en cada serie, lo que conduce a la relación $Q-T$; se reseñan, además, las propiedades estadísticas generales de las series observadas, considerando los problemas hallados en la modelación probabilística. Entre los aspectos más relevantes resultantes de este trabajo figuran los siguientes:

1. Se exponen los métodos para estimar los cuantiles de la distribución, utilizando por separado y juntos los datos regionales y los obtenidos *in situ*, utilizando métodos basados en los Momentos ponderados de probabilidades regionalmente promediadas, los métodos bayesianos y el modelo TCEV estimado regionalmente; también se

estudia la homogeneidad regional y la estimación de los cuantiles en zonas áridas.

2. Se discuten los métodos para elegir entre distintas distribuciones estadísticas, señalando que las pruebas estadísticas convencionales para determinar la calidad del ajuste tienen escaso valor en los estudios regionales.
3. Demuestra que las distribuciones Wakeby y del valor extremo general (GEV), utilizadas regionalmente con parámetros calculados por los momentos ponderados de probabilidad, son menos sensibles a los cambios de la distribución original desconocida que se estima con la modelación.

Recent advances in modelling of extreme hydrologic events. (H. Madsen y D. Rosbjerg, 1997)

Según este trabajo, y coincidiendo con la caracterización de décadas anteriores, en la actualidad prevalecen dos métodos para el análisis de los valores extremos: las series de valores máximos anuales (AMS) y las series de duración parcial (PDS). La diferencia fundamental entre estos métodos es la definición de la región de valor extremo; el método de PDS incluye todas las excedencias sobre un umbral predeterminado y el método de AMS considera sólo el máximo anual de cada año que compone la serie.

Para la estimación de eventos extremos, en ambos métodos la precisión está afectada por la cantidad de datos disponibles en el sitio de interés y una manera de suplir esta insuficiencia es utilizando información regional, combinando datos de sitios diferentes en una región que puede asumirse que tiene un comportamiento hidrológico similar; método que ha sido conocido como de Estación-Año. El uso de información regional reduce la incertidumbre y, además, facilita la selección de la distribución de frecuencia; del mismo modo este procedimiento facilita las estimaciones en lugares particulares sin datos, de una región donde existan otras localidades con observaciones. Las investigaciones a lo largo de la historia hasta el presente se han basado más en el método AMS, y poco se ha hecho en la utilización de las PDS.

En este artículo se presentan los avances logrados en la década de los años 90 en el caso específico del método PDS; específicamente, un esquema de estimación regional desarrollado para este modelo. El procedimiento incluye el concepto del índice-inundación y el método de *L-momentos*, para la estimación de parámetros regionales, la delineación de regiones homogéneas y la determinación de distribuciones regionales. Para una valoración más general de homogeneidad regional y la descripción de parámetros regionales, se introdujo un método de regresión basado en los mínimos cuadrados generalizados (GLS). El método de PDS proporciona una definición más apropiada de los valores extremos en una a región.

Proyecto FRIEND (Flow Regimen from International Experimental Network of Database) del Programa Hidrológico Internacional la UNESCO

Este proyecto comenzó en el año 1985, produciendo un vuelco en las investigaciones sobre la regionalización hidrológica de los eventos extremos. Los esfuerzos se centraron en el empleo de funciones de distribución de dos componentes, como la *SRQT-ETmax* o la *Gumbel doble*, el análisis regional y en el mejoramiento de la estimación de los parámetros estadísticos de las series, a través de un minucioso rescate de datos históricos y el desarrollo de bancos de datos regionales (Lang, 1997). En el marco de las numerosas investigaciones realizadas bajo la sombrilla del Proyecto FRIEND, y por ser uno de sus objetivos la generalización regional, se destaca la regionalización de los parámetros estadísticos asociados a las grandes precipitaciones.

Otros aspectos de interés en los trabajos que hoy se realizan fuera de Cuba son el empleo de modelos estocásticos con fines de prevención hidrológica, el empleo del radar meteorológico y los satélites para el estudio, la medición y el pronóstico del comportamiento de las grandes precipitaciones, el empleo de Sistemas de Información Geográfica y el conocimiento hidrometeorológico de las grandes precipitaciones según su origen, con particular atención a la influencia de la orografía (Llasat, 1997)

Esta síntesis de conocimientos, basada en obras seleccionadas, muestra la evolución conceptual habida en esta materia. Sin embargo, el análisis probabilístico de las series de variables hidrológicas máximas continua moviéndose en torno a la aplicación de las funciones de distribución tradicionalmente utilizadas para modelar series de muestras unipoblacionales, sin abordar, con la fuerza y el grado de generalización requeridos, las técnicas de modelado de dos componentes, ni de modelos de lluvia - escurrimiento como el *GRADEX*, ni la modelación matemática determinística; del mismo modo que las metodologías utilizadas son predominantemente estadísticas, sin tener un sustento físico apoyado en estudios de la física y la circulación de la atmósfera.

Otros elementos que han incidido desfavorablemente en este tipo de estudio han sido:

- La corta extensión de las series cronológicas utilizadas,
- la distribución espacial de los equipos seleccionados para los análisis no concordante con el patrón que caracteriza a cada tipo de evento generador de las precipitaciones,
- el uso inadecuado del concepto de analogía y la transposición de tormentas y
- la carencia de una base regional de referencia para el análisis del fenómeno.

Finalmente, como se nota en esta breve descripción del estado del conocimiento sobre este tema, no se han encontrado trabajos que traten el rol de las grandes precipitaciones en la disponibilidad de agua anual, lo cual es el objeto principal de la propuesta que se hace en el presente artículo.

3. INFLUENCIA DE LAS GRANDES PRECIPITACIONES

La cantidad de registros iguales y superiores a 100 mm en 24 horas es numéricamente muy elevado, en Cuba se registraron 32199 eventos de este tipo en los años comprendidos entre 1961-1990; sin embargo, las estadísticas de estos 30 años demuestran que este fenómeno representa solo el 1% del total de días con lluvias de un año, lo cual hace más relevante su influencia en los valores promedios de precipitación. Localmente, las grandes precipitaciones llegan a tener un peso notable en la precipitación anual (figura 1), existiendo zonas de Cuba donde la influencia es superior al 15% del valor promedio de 30 años, y años particulares donde la influencia es inmensa, como fueron los años 1979 y 1982 en la provincia de Pinar del Río al occidente de Cuba, debido al influjo de los ciclones Frederick y Alberto (tabla 1).

Tabla1. % que representaron las grandes precipitaciones (≥ 100 mm) en la lámina de anual de la provincia de Pinar del Río. Occidente de Cuba. Período 1961-1990

Año	%	Año	%
1961	15	1979	21
1962	4	1975	4
1963	3	1976	6
1964	8	1977	5
1965	4	1980	9
1966	7	1981	5
1967	13	1982	28
1968	7	1983	7
1969	14	1984	3
1970	14	1985	3
1971	13	1986	3
1972	12	1987	5
1973	3	1988	9
1974	3	1989	5
1978	6	1990	3

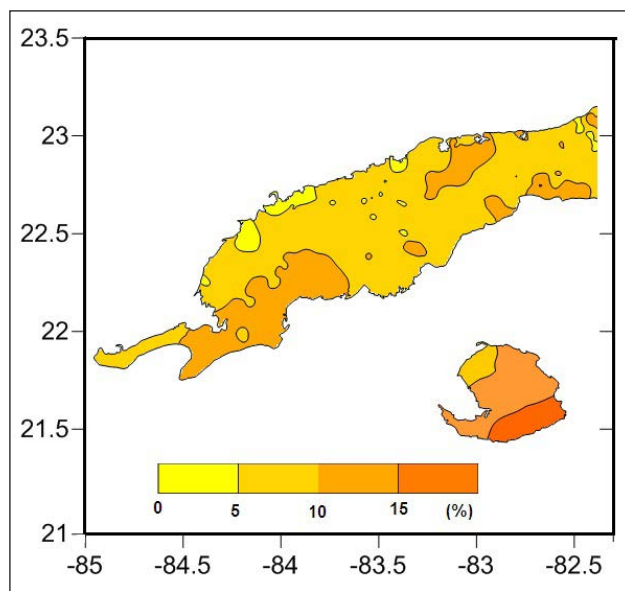


Figura 1. Influencia de las grandes precipitaciones en el valor promedio anual del período 1961 – 1990, expresada en %. Provincia Pinar del Río, Occidente de Cuba.

La influencia de estas precipitaciones en los acumulados anuales es significativa, no así en la tendencia de la marcha anual de esta variable. La figura 2 y tabla 2 demuestran que estas precipitaciones representan aproximadamente el 8% del valor medio y de la mediana del período 1961 – 1990, mientras que la tendencia de la serie no cambia al sustraerle al valor anual los acumulados producidos por las grandes precipitaciones. Lo anterior sugiere la prevalencia de patrones de fondo en la circulación atmosférica que favorecen la ocurrencia de las precipitaciones, no asociados a las situaciones meteorológicas que provocan las lluvias extremas que se observan en 24 horas (Aveledo, 2010).

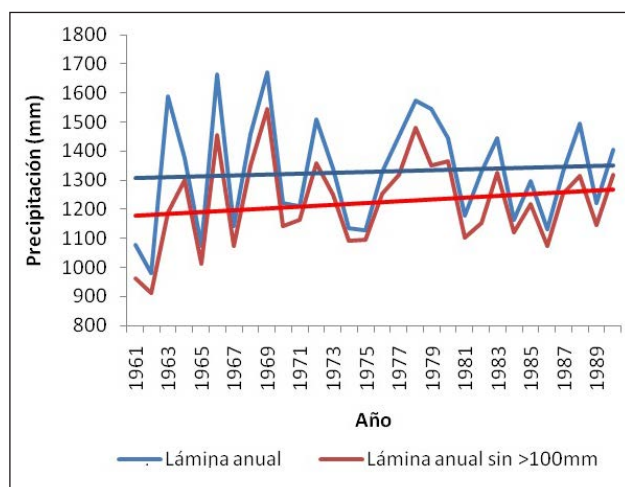


Figura 2. Influencia de las grandes precipitaciones en el valor promedio de la precipitación anual. Período 1961-1990

Tabla 2. Influencia de las grandes precipitaciones en el valor medio y mediana de la precipitación anual. Período 1961-1990

Estadísticos	Anual	Anual sin >=100 mm	Dif (mm)	%
Promedio anual (mm)	1330	1223	-107	8
Desviación estándar	184	150		
CV	0,14	0,12		
Mediana (mm)	1330	1234	-96	7

Lo hasta aquí descrito tiene apreciable repercusión en la calificación del nivel de pluviosidad de un año y, como consecuencia, en las acciones ingenieriles aplicadas al manejo y la utilización del agua. Los datos antes presentados, considerados conjuntamente con la frecuencia anual de estos fenómenos extremos, se puede afirmar que en el valor promedio anual e hiperanual de precipitaciones se enmascara un volumen de lluvia muy variable anualmente, en ocasiones de rara ocurrencia, que distorsiona las predicciones probabilísticas que se realizan con fines diversos, así como la interpretación de la pluviosidad de un año.

4. FRECUENCIA DE LAS GRANDES PRECIPITACIONES

La frecuencia en Cuba de las precipitaciones iguales o mayores de 100mm es baja. La figura 3 muestra el número de casos promedio anual en la provincia de Pinar del Río, basado en la serie 1961-1990. Para analizar esta figura téngase en cuenta que el número promedio de días con lluvia en este territorio es 120.

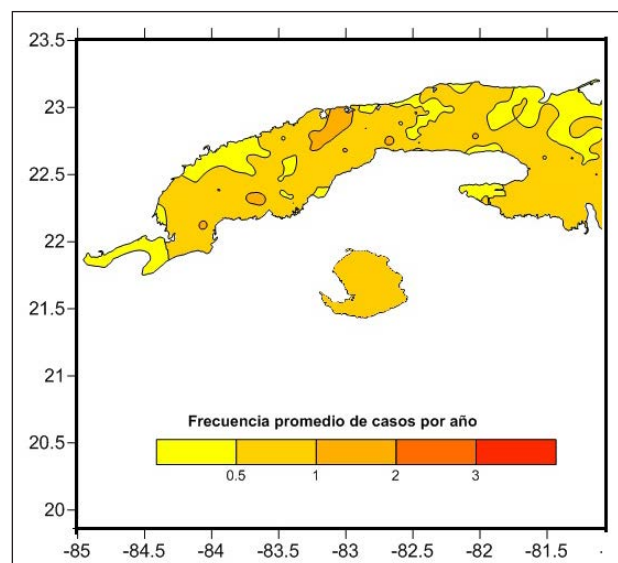


Figura 3. Número promedio de casos de eventos pluviales iguales o superiores a 100 mm en 24 horas. Provincia de Pinar del Río. Serie 1961-1990

El hecho de que los grandes eventos pluviales tienen una frecuencia diferente al resto de los fenómenos que producen lluvias, permite introducir el concepto de mezcla de poblaciones en el análisis de los valores promedio, para conocer la influencia de las grandes precipitaciones en el promedio anual, así como razonar y obtener conclusiones sobre problemas prácticos relacionados con el manejo del agua. Utilizando el concepto de mezcla de poblaciones desarrollado para el análisis de los extremos hidrológicos máximos absolutos, puede definirse que existe una lámina de lluvia anual promedio garantizada anualmente, que puede expresarse de la manera siguiente $P_g = P_a * p + P_{GP} * q$ (1); donde P_g es la precipitación promedio anual garantizada; P_a la precipitación promedio anual excluyendo los registros $\Rightarrow 100$ mm; P_{GP} es la lámina promedio de las grandes precipitaciones (registros $\Rightarrow 100$ mm); p es la frecuencia de las precipitaciones inferiores a 100 mm y q la frecuencia de las precipitaciones $\Rightarrow 100$ mm (Campos Aranda, 1987). La tabla 3 expone la comparación de los resultados del análisis probabilístico de la serie anual de precipitaciones en la provincia de Pinar del Río con poblaciones simples y mezcladas; apreciándose claramente la diferencia entre ambos resultados.

Tabla 3. Resultado de ajuste de función de probabilidad para poblaciones simples y mezcladas a los valores anuales de precipitación en la provincia de Pinar del Río en el occidente de Cuba

T	P_a	P_{GP}	Ajuste con poblaciones mezcladas	Ajuste con población simple
1000	2444	887	2330	3132
100	1994	489	1884	2410
50	1866	397	1758	2213
10	1575	220	1476	1783
5	1449	157	1354	1604
4	1406	138	1313	1546
2	1264	82	1177	1355

T: período de retorno,

P_a : serie de láminas anuales inferiores a 100 mm y

P_{GP} : serie de láminas anuales superiores a 100 mm

4.1 Lámina de precipitación anual garantizada

La lámina de precipitación promedio anual del período 1961-1990 en la provincia de Pinar del Río, calculada por promedio aritmético para los propósitos de este ejercicio, es 1330mm. Utilizando la ecuación (1), se descompone la lámina promedio anual en la producida por los eventos inferiores a 100mm, $P_a=1184$ mm, y producida por la grandes precipitaciones, $P_{GP}=146$ mm; la frecuencia de las láminas inferiores a 100 mm es $p=0,99$ y de las iguales o superiores $q=0,1$; de manera que la lámina

de precipitación promedio garantizada cada año sería 1171mm. El mismo ejercicio fue realizado para una selección de pluviómetros de esta provincia. El mapa de la figura 4 muestra la lámina de precipitación promedio anual no garantizada anualmente (1961-1990).

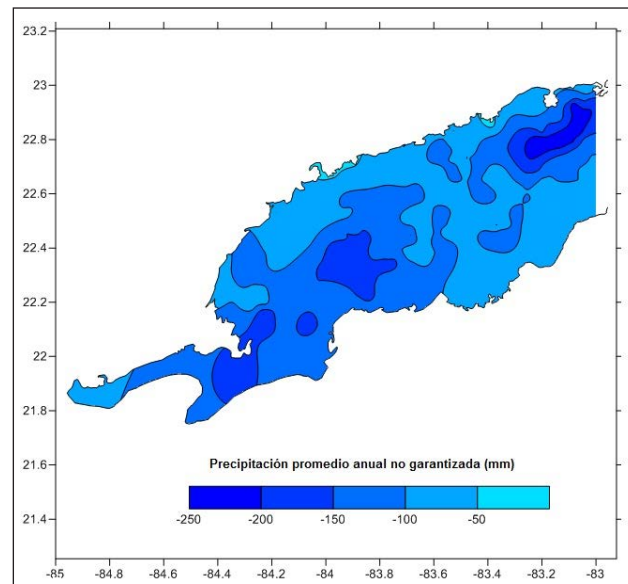


Figura 4. Distribución de la lámina no garantizada anualmente P_{GP} . Provincia de Pinar del Río. Período 1961 – 1990.

4.2 Influencia en el escurrimiento

Para tener una aproximación de cómo las grandes precipitaciones pueden repercutir en la disponibilidad promedio de agua de un territorio, se utiliza el módulo de escurrimiento obtenido para las regiones hidrológicas de Cuba a partir de la relación precipitación caudal (Batista, 1990). Al respecto, el mencionado autor indica que “es conocido que las relaciones lluvia – escurrimiento generalmente son complicadas y están determinadas en lo fundamental por la cantidad, la intensidad, y la distribución de la lluvia en las cuencas; así como por otra serie de factores como las condiciones de humedad antecedente, la alimentación subterránea y las extracciones de agua que contribuyen a indefiniciones no explicables”. No obstante, en la literatura y la práctica hidrológicas está comprobada la utilidad y precisión de la relación precipitación-escurrimiento; de manera que basado en observaciones de la red de estaciones de caudal que existe en el país se construyeron ecuaciones que permiten calcular el módulo de escurrimiento en función de la relación comentada. Para la Región occidental la relación lluvia escurrimiento quedó definida como $M_o = 1.15 * P^{4.74} * 10^{-14}$ (2), donde M_o es el módulo de escurrimiento y P la precipitación anual. Por supuesto que el resultado sería más exacto si el análisis se hiciera directamente desagregando series de caudales en lugar de utilizar métodos indirectos como se presenta en este artículo a modo de aproximación al tema.

Considerando la lámina de lluvia promedio del período 1961-1990 estimada para este trabajo para la provincia de Pinar del Río en 1330mm, y utilizando la ecuación (2), que expresa la relación lluvia - escurrimiento en esa provincia, el módulo de escurrimiento promedio anual es 7,37l/s*km², lo que equivale aproximadamente a 2063,0 millones de m³ de agua promedio anual; estimando ahora el módulo de escurrimiento para la lámina garantizada como promedio cada año (1171 mm); el módulo de escurrimiento promedio anual es 4,0 l/s*km², equivalentes a 1133,0 millones de m³ de agua; lo que significaría que cada año como promedio existen 930 millones de m³ de agua no garantizados anualmente. Estas cifras no son exactas, pero dan una idea de cómo las grandes precipitaciones influyen en el valor promedio y pueden repercutir en todos los cálculos que a partir de él se hagan, fundamentalmente en el

dimensionamiento de las obras hidráulicas y en el manejo de agua represada.

Solamente para ilustrar como lo anteriormente descrito pudiera influir en la garantía de la entrega de agua de un embalse comprometido para la agricultura, a continuación se presenta un análisis del volumen de escurrimiento anual garantizado para un 75% en una cuenca seleccionada en la Provincia de Pinar del Río. La tabla 4 contiene la distribución por año de la precipitación y del volumen de escurrimiento en la cuenca, presentado en dos series cronológicas, la anual observada y la anual garantizada según se ha definido en este artículo. La figura 4 representa las veces de fallo del escurrimiento del 75% de probabilidad. Una simple inspección de los gráficos de la figura 4 demuestra la diferencia entre la cantidad de veces que la entrega anual falla con el análisis tradicional. Son obvias las implicaciones en la garantía de la entrega.

Tabla 4. Distribución anual de la precipitación y el volumen de escurrimiento (total y garantizado) en embalse hipotético ubicado en Pinar del Río (Período 1965-1990)

Año	P total (mm)	Mo (m ³ /s/km ²)	Wtotal (m ³ .10 ⁶)	P garantizada (mm)	Mo (m ³ /s/km ²)	Wgarantizado (m ³ .10 ⁶)
1965	1106	0,01	71,6	1032	0,01	62,1
1966	1514	0,02	155,3	1336	0,01	110,7
1967	1419	0,02	129,7	1116	0,01	72,8
1968	1451	0,02	137,9	1283	0,01	100,1
1969	1907	0,04	327,6	1470	0,02	142,9
1970	1305	0,01	104,4	987	0,01	57,1
1971	1205	0,01	86,3	945	0,01	52,7
1972	1660	0,03	205,0	1310	0,01	105,4
1973	1297	0,01	102,7	1231	0,01	90,7
1974	1066	0,01	66,3	1003	0,01	58,9
1975	1310	0,01	105,3	1220	0,01	88,8
1976	1564	0,02	170,6	1388	0,02	122,3
1977	1521	0,02	157,2	1381	0,02	120,6
1978	1695	0,03	219,2	1533	0,02	160,9
1979	1849	0,04	293,2	1218	0,01	88,5
1980	1535	0,02	161,5	1288	0,01	101,0
1981	1159	0,01	79,1	1055	0,01	65,0
1982	1863	0,04	301,5	1036	0,01	62,6
1983	1773	0,03	254,1	1570	0,02	172,8
1984	1160	0,01	79,3	1102	0,01	70,9
1985	1194	0,01	84,6	1122	0,01	73,7
1986	1178	0,01	82,0	1118	0,01	73,1
1987	1258	0,01	95,4	1145	0,01	77,0
1988	1445	0,02	136,3	1227	0,01	90,0
1989	1257	0,01	95,2	1150	0,01	77,8
1990	1085	0,01	68,7	1020	0,01	60,8
Promedio	1415	0,02	145,0	1203	0,01	86,0

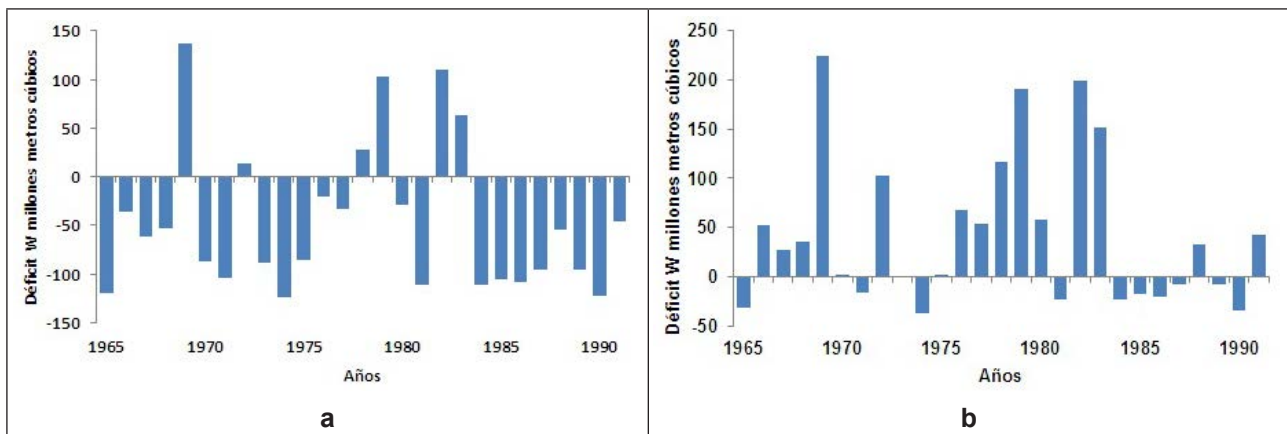


Figura 4. (a) Años y magnitud de fallo del volumen de escurrimiento con garantía del 75% de probabilidad estimado con serie de valores sin análisis mezclado; (b) Años y magnitud de fallo del volumen de escurrimiento con garantía del 75% de probabilidad estimado con serie de valores con análisis mezclado

5. CONCLUSIONES

El análisis de los extremos hidrológicos tiene aún muchas aristas que abordar; sobre todo en lo relacionado con su influencia en los valores promedio y la manera como estos pueden interpretarse según sea el objetivo de un estudio. Los valores promedio de precipitación y escurrimiento, en particular su modelado probabilístico, suelen utilizarse como punto de partida para el dimensionamiento de un embalse y también para decidir la entrega de agua con una garantía dada. Muchas veces la entrega de agua falla, y se atribuye a la variabilidad climática; sin embargo, como demuestra este artículo, la no satisfacción de la garantía de entrega pudiera deberse a una valoración inadecuada del papel de los extremos hidrológicos, en este caso los máximos, en el régimen de una cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfonso, A., B. Lapinel y L. Naranjo. 1997. Tormentas locales severas, grandes precipitaciones y sequías. Variaciones y cambios del clima en Cuba. Capítulo 4, Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología, pag. 35-44.
- Arencibia, G, 2009. Sistema de reconocimiento de patrones de eventos de lluvias intensas en la mitad occidental de Cuba. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciancia Meteorológicas, pag. 100
- Aveledo, 2010. Caracterización de las situaciones climáticas y sinópticas que favorecen la permanencia en la región occidental de cuba de períodos estacionales consecutivos con abundantes acumulados de precipitaciones entre 1961 y 2000. Trabajo de diploma Licenciatura en Meteorología. Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas. La Habana. Cuba, pag. 100.
- Batista, J. L. 1990. Cálculo del escurrimiento medio anual sin observaciones hidrométricas. Instituto de Hidroeconomía. La Habana. Cuba, pag. 64.
- Campos Aranda, D.F. 1987. Análisis probabilístico de avenidas máximas con poblaciones mezcladas. Ingeniería Hidráulica en México, septiembre-diciembre 1987.
- Cunnane, C.: 1989. Statistical distributions for flood frequency analysis, WMO 718, Operational Hydrology Report No 33.
- FRIEND, Third report: 1994-1997, Chapter 5 - Heavy rains. UNESCO. Cemagref Editions, p. 277-283.
- Koshiasvili, B. 1972. Las lluvias torrenciales en Cuba. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana, Cuba.
- Lapinel, B. 1988. La circulación atmosférica y las características espacio-temporales de las precipitaciones en Cuba. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geográficas. Instituto de Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba.
- Lang, M. 1997. New development with AGREGEE, a statistical model using hydrometeorological information. FRIEND, Third report: 1994-1997, Chapter 4 - Flood. UNESCO. Cemagref Editions, p. 181-191.
- Llasat, M.C. 1997. Heavy rains. FRIEND, Third report: 1994-1997, Chapter 5 - Heavy rains. UNESCO. Cemagref Editions.
- Madsen H. y Rosbjerg D. 1997. Recent advances in modelling of extreme hydrologic events. Hydroinformatics 98, Balkema, Vol. 2, 1129 - 1136.
- Martínez, S., 1958. Intensidad de la lluvia en La Habana Martínez, S., 1958. Archivos del Instituto de Hidroeconomía. Cuba.

14. Matakiev D. 1973. El escurrimiento medio y formas de las avenidas. Grupo Hidráulico Nacional.
15. Millás, J.C., 1943. La lluvia en la Habana, Observatorio Nacional de Cuba, pag. 43
16. Planos Gutiérrez E. 1991 Características Hidrológicas de las Lluvias Torrenciales
17. Planos, E., 2000: Análisis Hidrológico de las grandes precipitaciones: Distritos físico-geográficos Pinar del Río, Habana-Matanzas y Centro, Tesis en opción el grado científico de Doctor en Ciencias Geográficas, Ministerio de Educación Superior, La Habana.
18. Planos, E. M. Limia y R. Vega, 2005. Intensidad de las precipitaciones en Cuba Remenieras, G. 1968. Hidrología del ingeniero. Instituto Cubano del Libro, La Habana, Cuba.
19. Planos, E; M. Limia; R. Vega, M. Hernández, D. Boudet (2012). Las grandes precipitaciones en Cuba: causas y características. Instituto de Meteorología. Programa Científico Técnico Ramal "Análisis y pronóstico del tiempo y el clima terrestre y espacial. Agencia de Medio Ambiente. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. La Habana. Cuba, pag. 242.
20. Sevruk B y H. Geiger, 1981. Selection of ditribution types for extremes of precipitation. WMO No. 560. World Meteorological organization. Geneva.
21. Trusov I.I, 1967. Mapas isoyéticos de la lámina de lluvia media máxima y del 1, 5 y 10% de probabilidades. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.